

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.13.002

微滤膜与动态膜强化厌氧处理生活污水的性能对比

刘 乐^{1,2}, 段 傲^{1,2}, 田文瑞³, 胡以松^{1,2}, 杨 媛^{1,2}, 陈 荣^{1,2},
王晓昌^{1,2}

(1. 西安建筑科技大学 陕西省环境工程重点实验室, 陕西 西安 710055; 2. 西安建筑科技大学 西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 陕西 西安 710055; 3. 陕西高速环境科技有限公司, 陕西 西安 710018)

摘 要: 选用尼龙网与微滤膜作为膜基材构建了升流式厌氧动态膜生物反应器(AnDMBR)和厌氧膜生物反应器(AnMBR)小试装置并处理生活污水,对比分析了反应器的过滤性能、污染物去除效果、污泥及泥饼特性。AnDMBR对浊度的去除率约为94%,略低于AnMBR(98%),两者对COD的去除率无明显差别,甲烷产量相近,但出水中均含有溶解性甲烷,约占甲烷总产量的60%~80%。AnMBR的跨膜压差(TMP)增长速率(0.91~1.70 kPa/d)远高于AnDMBR(0.01~0.06 kPa/d)。厌氧污泥的胞外聚合物(EPS)含量相差不大,但AnMBR泥饼层中的EPS是AnDMBR的2.3~2.7倍,微滤膜污染更为严重,需经过物化清洗才能有效恢复膜通量,而动态膜通量通过物理清洗即可恢复。

关键词: 厌氧动态膜生物反应器; 厌氧膜生物反应器; 生活污水; 过滤性能; 产甲烷; 污泥性质

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)13-0009-07

Performance Comparison between Microfiltration Membrane and Dynamic Membrane in Anaerobic Wastewater Treatment

LIU Le^{1,2}, DUAN Ao^{1,2}, TIAN Wen-rui³, HU Yi-song^{1,2}, YANG Yuan^{1,2},
CHEN Rong^{1,2}, WANG Xiao-chang^{1,2}

(1. Shaanxi Key Laboratory of Environmental Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. Key Laboratory of Northwest Water Resource, Environment and Ecology <Ministry of Education>, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 3. Shaanxi High-speed Environmental Technology Co. Ltd., Xi'an 710018, China)

Abstract: The lab-scale upflow AnDMBR and AnMBR were equipped with nylon mesh and microfiltration (MF) membrane to treat domestic wastewater. The filtration performance, pollutants removal, sludge and cake layer characteristics of the bioreactors were compared. The results showed that the turbidity removal of AnDMBR (94%) was lower than that of AnMBR (98%). The COD removal rates and methane production rates of the two reactors were similar, but dissolved methane accounted for about 60%~80% of the total methane production. The increase rate of trans-membrane pressure (TMP) of

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2022JM-237); 陕西省科技创新团队项目(2019TD-025)

通信作者: 胡以松 E-mail: huyisong@xauat.edu.cn

AnMBR (0.91–1.70 kPa/d) was much higher than that of AnDMBR (0.01–0.06 kPa/d). There was no significant difference in extracellular polymer (EPS) content between the two reactors at the end of operation. However, the EPS content in the cake layer of AnMBR was 2.3–2.7 times that of AnDMBR, so the fouling of MF membrane was more serious. The flux of the MF membrane could be effectively restored by physical and chemical cleaning, whereas the flux of the dynamic membrane could be restored only by physical cleaning.

Key words: anaerobic dynamic membrane bioreactor; anaerobic membrane bioreactor; domestic wastewater; filtration performance; methanogenesis; sludge characteristics

厌氧膜生物反应器(AnMBR)将厌氧生物处理和膜滤相结合,实现了水力停留时间(HRT)和污泥龄(SRT)完全分离,能够高效富集厌氧微生物^[1]。除了具有传统厌氧消化的特点外,AnMBR还具有启动快、污染物去除率高等优势,但是厌氧污泥因含有大量生物聚合物且黏度高,导致其比好氧膜生物反应器的膜污染更为严重^[2],易导致跨膜压差(TMP)快速增长、膜通量降低以及膜清洗/运行成本增加^[3],制约了AnMBR的实际应用。膜污染分为可逆污染和不可逆污染,通常前者通过物理清洗即可消除,而后者只能用化学清洗去除^[4]。

新兴的动态膜(DM)技术利用膜污染层作为固液分离介质来强化去除污染物^[5],DM支撑材料的孔径通常为10~200 μm^[6],将DM技术应用到AnMBR中,形成了厌氧动态膜生物反应器(AnDMBR)^[7],具有成本低、通量高及易清洗等优点,因而近年来AnDMBR提供了替代传统AnMBR的可能性。已有文献分别对AnDMBR和AnMBR的工艺性能进行研究^[8-9],但直接的对比研究仍相对缺乏,为此笔者选用孔径为75 μm的尼龙网与孔径为0.2 μm的微滤膜作为膜基材,构建了升流式AnDMBR与AnMBR装置,并处理实际生活污水。平行运行两组反应器,对比分析了膜过滤性能、污染物去除效果、产甲烷效果、污泥及泥饼特性,考察AnDMBR在常温下处理生活污水的可行性和优势。

1 材料与方法

1.1 试验装置

两组升流式厌氧反应器由有机玻璃制成,工作容积为3.65 L,顶部浸没安装动态膜与微滤膜,膜材料分别是尼龙网(孔径为75 μm)与微滤膜(孔径为0.2 μm),膜组件的有效面积为0.02 m²,工艺流程见文献[10]。反应器的进水蠕动泵(Longer BT-

100)连接液位继电器以控制液位恒定,出水蠕动泵连接时间继电器以保证间歇出水,出水管连接在线压力表(SIN-P400)以监测TMP变化,气体管路连接湿式气体流量计(TC-2)以监测生物气产量,反应器连接水浴装置,保证试验温度为(25±1)℃。

1.2 试验设计与运行条件

按HRT将对比试验划分为3个阶段,各阶段的进水水质及运行参数如表1所示(OLR为有机负荷率)。TMP达到25~30 kPa,视为膜污染严重,因此AnMBR在阶段I和阶段II运行结束后采用离线清洗以恢复膜通量,而AnDMBR在3个阶段内未清洗/更换膜组件。微滤膜的清洗方法如下:水力清洗辅以刷洗去除泥饼层,NaClO溶液(3 g/L)浸泡24 h去除有机污染物,柠檬酸溶液(10 g/L)浸泡2 h去除无机污染物。试验进水取自西安市某校园的生活污水,接种污泥取自西安市某啤酒厂的UASB反应器,初始污泥浓度(MLSS)为5.5 g/L。

表1 各阶段反应器的进水水质及运行参数

Tab.1 Influent quality and operational parameters at each phase

阶段	时间/d	进水 COD/ (mg· L ⁻¹)	OLR/ (g· L ⁻¹ · d ⁻¹)	进水 浊度/ NTU	HRT/h	抽停 时间 比	平均通 量/(L· m ⁻² ·h ⁻¹)
I	1~28	458.8	0.26	179.5	42.8	4:1	4.3
II	29~48	428.3	0.33	150.6	31.6	3:1	5.8
III	49~70	639.6	0.64	183.6	24.0	9:1	7.7

1.3 分析方法

MLSS、COD、TN、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、PO₄³⁻-P、TP、浊度采用国家标准分析方法测定^[11]。胞外聚合物(EPS)采用热处理法提取,其主要组分为蛋白质和多糖,分别采用Folin-酚试剂法和硫酸-蒽酮法测

定。溶解性甲烷采用顶空法测定^[12],将水样迅速转移至血清瓶(122 mL)中并密封,用注射器将 40 mL 氮气置换出同体积水样,而后再将血清瓶置于振荡器中(120 r/min, 25 °C, 24 h),根据顶空释放的气量、气组分和甲烷溶解度计算溶解性甲烷量。生物气(CH_4 、 CO_2 、 N_2 、 H_2)组分采用气相色谱仪(GC7900)测定,溶解性有机物(DOM)采用荧光分光光度计(F7000)测定,膜表面形貌采用扫描电子显微镜(MLA650F)分析,粒径分布(PSD)采用激光粒度分析仪测定。

2 结果与讨论

2.1 过滤性能

AnDMBR 与 AnMBR 在 3 个运行阶段的 TMP 和进出水浊度如图 1 所示。

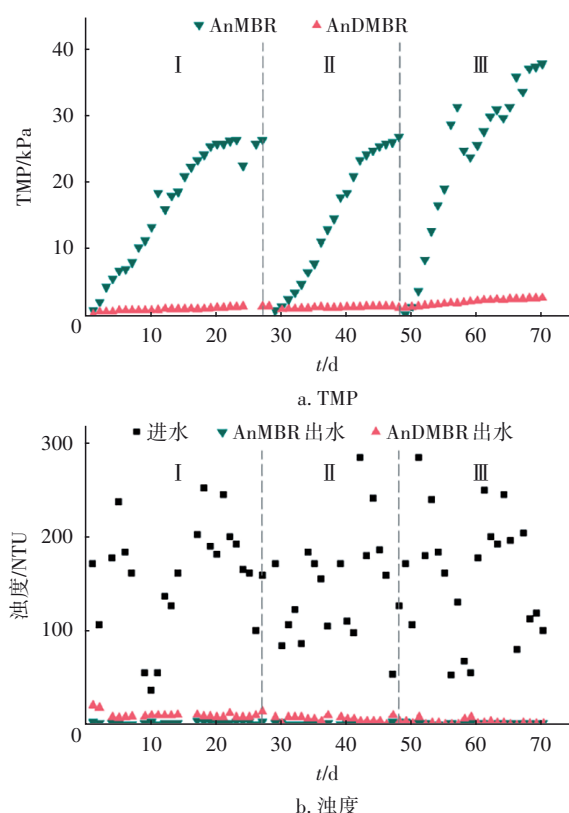


图1 TMP和浊度随时间的变化

Fig.1 Variation of TMP and turbidity with time

AnMBR 在 3 个阶段末期的 TMP 分别增至 27.3、27.9 和 37.9 kPa, TMP 增长率分别为 0.91、1.30 和 1.70 kPa/d。AnDMBR 运行结束时 TMP 分别增至 1.5、1.5 和 2.8 kPa, 增长率分别为 0.01、0.01 和 0.06 kPa/d, 比其他 AnDMBR 的 TMP 增长率更低^[13]。结果表明,随 HRT 降低,各阶段末期 TMP 和 TMP 增长率逐渐增大,原因可能是出水通量增加,污泥絮

体受到出水泵的抽吸作用增大,小颗粒更容易吸附至膜表面导致泥饼层厚度增加,并释放大量胞外聚合物^[14]。但是,AnMBR 的 TMP 和 TMP 增长率远高于 AnDMBR,主要原因是:①AnMBR 采用的微滤膜孔径小,具有较高的污染物截留能力^[15];②微滤膜采用物化清洗后仍存在不可逆污染。

进水浊度变化幅度较大,但 AnMBR 的出水浊度稳定并始终低于 5 NTU,去除率均高于 98%,表明 HRT 对浊度去除率无影响。AnDMBR 在第 I 阶段的 1~2 d 内出水浊度为 25 NTU 左右,随后稳定在 (10.7 ± 3.4) NTU,表明运行初期为动态膜形成期,对污泥絮体及颗粒物等物质截留率较低。在阶段 II 和阶段 III AnDMBR 的出水浊度分别为 (8.0 ± 1.7) 、 (8.1 ± 0.9) NTU,3 个阶段的浊度去除率分别为 94.0%、94.7% 和 95.6%,这与好氧 DMBR(尼龙网孔径为 30 μm)的结果类似^[16]。浊度去除率随 HRT 降低而增大,这是因为 TMP 逐渐升高,但也要避免 TMP 过高,否则会导致 DM 的破坏、污泥流失,引起出水水质变差、浊度升高^[17]。AnDMBR 的浊度去除率略低于 AnMBR,主要与膜基材孔径大小及动态膜表面泥饼层的截留作用有关^[9]。综上,待稳定的动态膜形成后,两组反应器的出水浊度差异较小,动态膜可代替微滤膜达到相近的过滤效果。

2.2 对污染物的去除及产气效果

AnDMBR 和 AnMBR 进水、上清液和出水 COD 的变化如图 2 所示。

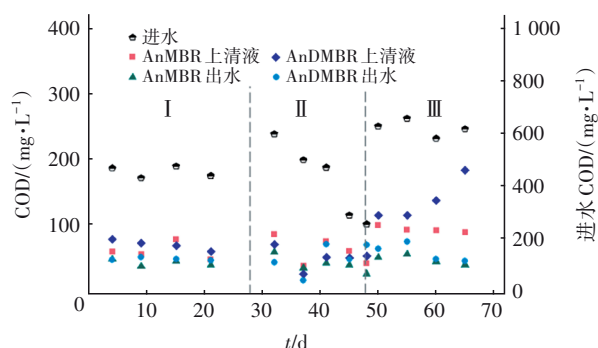


图2 AnDMBR和AnMBR对COD的去除效果

Fig.2 COD removal in the AnDMBR and AnMBR

两组反应器的出水 SCOD 浓度均比上清液小,表明动态膜与微滤膜除了物理筛分作用,还可以利用污染层中的活性微生物去除部分溶解性有机物(DOM)^[18]。AnDMBR 和 AnMBR 中污泥床对 COD 的去除率分别为 77.9%~84.3% 和 84.7%~85.6%,

表明反应器主要依靠厌氧微生物来去除 COD。AnDMBR 对 COD 的总去除率(87.1%~90.1%)与 AnMBR(88.5%~89.6%)接近,且都比较稳定,表明 HRT 对 COD 总去除率无明显影响,且 AnDMBR 不会

因稍大的膜孔径影响出水水质,是在常温、高通量操作条件下有前景的污水处理替代方案^[10]。

两组反应器对 TN、 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 、 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 及 TP 的去除效果如表 2 所示。

表 2 AnDMBR 和 AnMBR 对常规污染物的去除效果

Tab.2 Conventional pollutants removal in the AnDMBR and AnMBR

$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

项 目		COD	SCOD	TN	NH_4^+-N	NO_3^--N	TP	$\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$
阶段 I	进水	458.8±24.0	137.6±10.7	42.3±0.8	34.9±2.2	1.6±0.1	4.7±0.1	2.5±0.1
	AnDMBR 出水	54.1±2.7	52.8±2.7	39.7±4.2	30.8±3.4	0.6±0.2	4.1±0.5	4.1±0.4
	AnMBR 出水	50.9±8.0	50.9±8.0	39.2±5.8	32.0±3.5	0.9±0.1	4.1±0.4	4.1±0.2
阶段 II	进水	428.3±142.5	110.5±50.4	58.6±8.6	45.0±5.7	3.6±0.5	4.9±2.3	1.5±0.3
	AnDMBR 出水	55.2±11.4	37.8±20.2	53.3±2.7	47.5±1.3	1.1±0.7	3.8±1.0	2.7±0.2
	AnMBR 出水	49.1±14.1	47.2±16.8	46.3±0.9	33.7±5.4	1.1±0.7	2.9±0.1	2.4±0.9
阶段 III	进水	639.6±77.3	236.7±40.5	50.1±6.1	38.2±4.7	3.5±0.4	5.8±0.6	4.0±0.6
	AnDMBR 出水	63.2±13.7	55.7±20.0	47.8±3.4	33.3±4.1	1.5±0.3	3.4±1.3	3.1±1.1
	AnMBR 出水	66.5±7.1	58.5±5.0	45.5±4.2	36.9±2.3	1.1±0.9	3.4±1.0	3.2±0.8

从表 2 可以看出,各 HRT 条件下,两组反应器的脱氮除磷效果无明显区别。因反应器缺少合适的环境条件,对 NH_4^+-N 、 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 均无明显去除效果; TN 和 TP 去除率分别为 4.6%~21.0% 和 12.8%~41.0%,推测是因为膜可截留部分颗粒态 TN 及 TP; NO_3^--N 的去除率较高(43.8%~69.4%),可能是反硝化菌在厌氧条件下还原硝酸盐而得到去除。

AnDMBR 和 AnMBR 生物气产量和组分在同一阶段相差不大(如图 3 所示),这是因为产甲烷菌主要在反应器下部污泥层内,并且反应器除膜组件的外部条件相同。HRT 降低虽然引起有机负荷率(OLR)和物质浓度提高,使两组反应器的产气量增加^[18],但是各阶段产气量略低(17~80.5 mL/d),甲烷占生物气组分的 68%~78%,分析是因为大部分颗粒有机物是缓慢/不可生物降解的物质^[19]、低温抑制了微生物活性^[20]以及出水中存在溶解性甲烷。

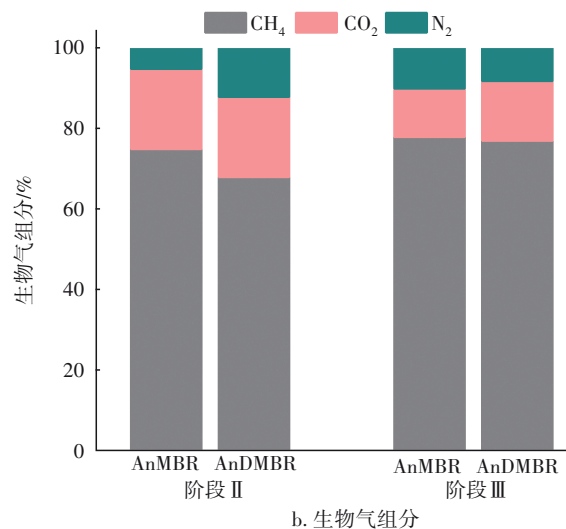
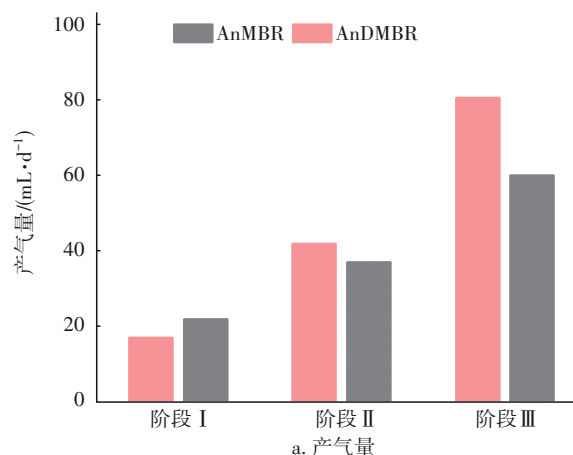


图 3 AnDMBR 和 AnMBR 的产气量和生物气组分

Fig.3 Biogas production and biogas composition of the AnDMBR and AnMBR

AnDMBR 和 AnMBR 各阶段的溶解性甲烷产量占总甲烷产量的比例均较高(60%~80%),与文献[21]的结论相同,是因为甲烷极易在低温及常温下溶于水中,而升流式反应器的水力扰动较弱,不利于溶解性甲烷的释放^[22]。

2.3 溶解性有机物分析

AnDMBR 与 AnMBR 的进水、上清液和出水中 DOM 的 EEM 图谱如图 4 所示。各水样的荧光光谱均有两个明显的荧光峰,即峰 b 和峰 c,其中前者为色氨酸类蛋白质($\lambda_{\text{Ex}}/\lambda_{\text{Em}}$ 为 275~285 nm/325~335 nm),后者代表芳香类蛋白质($\lambda_{\text{Ex}}/\lambda_{\text{Em}}$ 为 230~245

nm/300~375 nm)。从图4可以观察到进水中存在大量的蛋白质类物质(峰b、峰c的荧光强度分别为534.2、373.0),而后生物降解掉大部分蛋白质类物质,最后通过污染层的微生物作用和膜截留进一步去除。AnDMBR与AnMBR出水的峰b荧光强度(364.0、349.2)和峰c荧光强度(273.4、276.8)都低于上清液(403.1、355.0和300.3、259.5),说明膜表面活性微生物会降解蛋白质类物质以产生甲烷^[13],同2.2节结论一致。进水、AnDMBR出水、AnMBR出水的峰a即腐殖酸类物质($\lambda_{Ex}/\lambda_{Em}$ 为275~335 nm/380~385 nm)的强度为239.0、276.9、272.1,峰d即富里酸类物质($\lambda_{Ex}/\lambda_{Em}$ 为240~250 nm/380~395 nm)强度为234.3、235.7、238.5,腐殖酸和富里酸类物质的去除率不降反升,可能是因为这两类物质与微生物代谢有关,随着EPS含量的增加而增加^[1]。

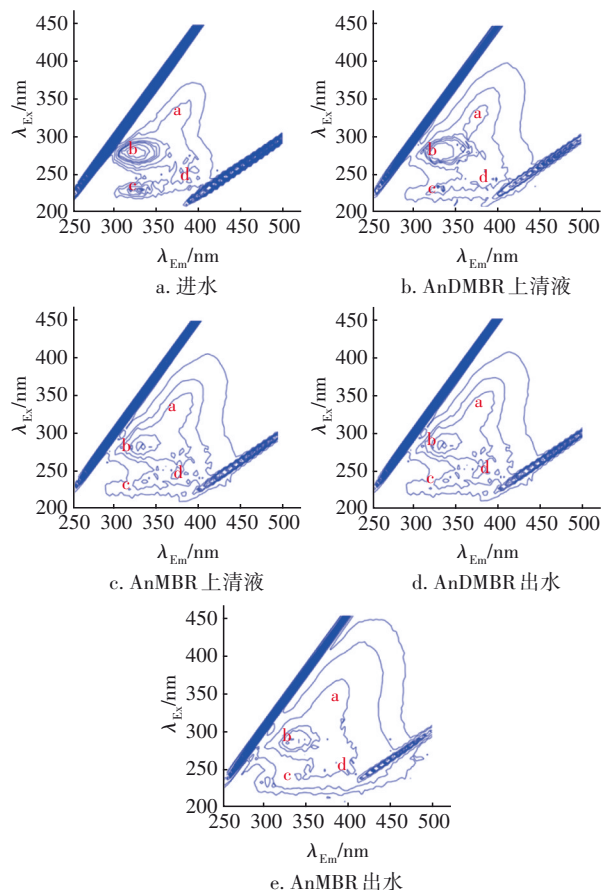


图4 DOM的三维荧光图谱

Fig.4 Three-dimensional fluorescence spectra of DOM

2.4 污泥及泥饼特性分析

2.4.1 污泥特性分析

运行结束后AnDMBR的溶解性胞外聚合物(SEPS)和结合性胞外聚合物(BEPS)含量分别为

11.66、24.99 mg/g;而AnMBR内从阶段I到阶段III结束时SEPS和BEPS分别从5.04、17.32 mg/g增长至11.16、25.89 mg/g。SEPS和BEPS含量随HRT的降低而增加,推测原因为:①流速增大强化了传质过程,由于代谢较快而加快了EPS分泌;②有机负荷增加促进了微生物的生长繁殖。EPS变化趋势与AnMBR的TMP增长率变化相一致,表明EPS是引起膜污染的原因之一。SEPS与BEPS中的蛋白质含量始终高于80%,表明蛋白质是膜阻力的主要污染物。AnDMBR内SEPS和BEPS蛋白质含量与AnMBR差别不明显,由于AnDMBR的动态膜层孔隙率稍大,因此TMP增长率远低于AnMBR。

2.4.2 泥饼特性分析

图5为两组反应器的新膜组件和阶段III运行结束后的膜组件照片及SEM图像。

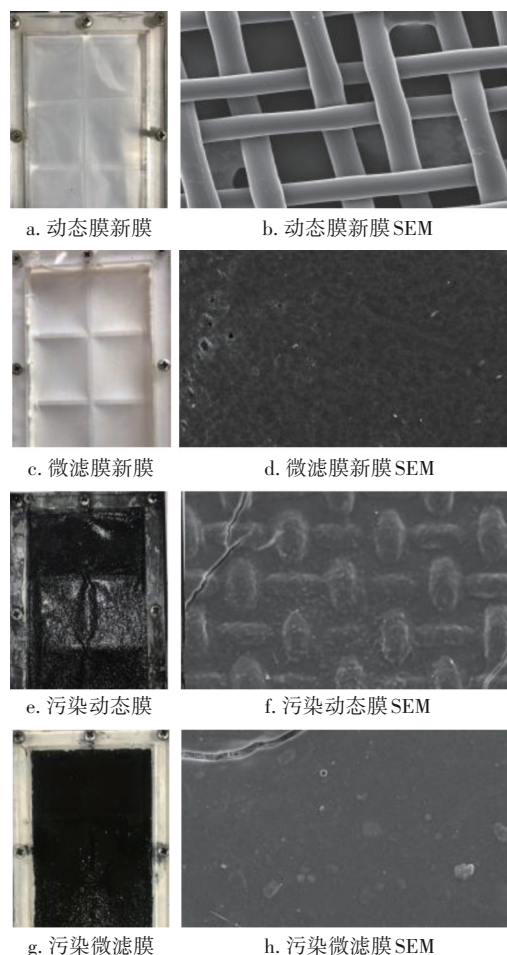


图5 AnDMBR和AnMBR的膜组件照片和SEM图像(×500)

Fig.5 Membrane assemblies and SEM pictures (×500) of the AnDMBR and AnMBR

SEM图中观察到新膜的表面均光滑平整,尼龙

网网孔清晰可见,而微滤膜网孔细小,无法明显观察到孔隙。污染后的动态膜可看到尼龙网轮廓,泥饼层相对松散,而微滤膜表面被胶体及悬浮物均匀覆盖,说明泥饼层较密实。对污染后的尼龙网进行水力清洗后,其形态结构与新膜基本相同,与Yang等的结论相同^[10],说明尼龙网经过物理清洗即可恢复通量;但微滤膜经过物理清洗后仍覆盖凝胶层,再经过化学清洗才能基本去除污染物以恢复其过滤性能。

对膜组件上污染层污泥粒径分布的测定结果显示,动态膜和微滤膜污染层的平均粒径分别为208.6、64.35 μm ,因为动态膜形成初期小粒径颗粒会随水流流出,而截留粒径较大的颗粒。

AnDMBR运行结束后测得泥饼层的SEPS和BEPS含量分别为8.71、24.94 g/m^2 ; AnMBR从阶段I到阶段III结束时SEPS、BEPS分别为21.79、28.18、27.22 g/m^2 和56.00、61.74、56.29 g/m^2 。AnMBR泥饼层中EPS含量是AnDMBR的2.3~2.7倍,一方面是因为较大的膜孔径容易使蛋白质、多糖等物质通过;另一方面是多糖更容易被吸附在微滤膜表面^[23],且微滤膜表面上的多糖含量远高于尼龙网膜表面。AnMBR泥饼层中高EPS含量也说明了生物聚合物是形成更厚的泥饼层的原因,导致TMP增长率更大^[22]。

3 结论

① 3个阶段AnMBR的出水浊度始终低于5 NTU, AnDMBR的稳定出水浊度为8.0~10.7 NTU, HRT降低对浊度的去除无影响,且AnDMBR的浊度去除率略低于AnMBR;膜组件类型对常规污染物的去除无明显影响,表明动态膜具有代替微滤膜完成固液分离的潜力。两组反应器的产气量相当,但是出水中均含有大量的溶解性甲烷,约占甲烷总产量的60%~80%。

② 随着HRT的降低,AnMBR的TMP增长率逐渐增大,膜污染速率加快,而AnDMBR的TMP增长率稳定在较低水平;污泥EPS含量增加加速了AnMBR膜污染,对AnDMBR无明显影响。动态膜的泥饼层松散,水力清洗即可实现再生,而微滤膜的泥饼层结构致密,需采取频繁的物化清洗恢复膜通量。AnDMBR具有高通量、低膜污染的技术优势,在污(废)水处理领域具有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] LEI Z, YANG S, LI Y Y, *et al.* Application of anaerobic membrane bioreactors to municipal wastewater treatment at ambient temperature: a review of achievements, challenges, and perspectives [J]. *Bioresource Technology*, 2018, 267: 756-768.
- [2] HU Y, WANG X C, NGO H H, *et al.* Anaerobic dynamic membrane bioreactor (AnDMBR) for wastewater treatment: a review [J]. *Bioresource Technology*, 2018, 247: 1107-1118.
- [3] DENG L, GUO W, NGO H H, *et al.* A comparison study on membrane fouling in a sponge-submerged membrane bioreactor and a conventional membrane bioreactor [J]. *Bioresource Technology*, 2014, 165: 69-74.
- [4] ASLAM A, KHAN S J, SHAHZAD H M A. Anaerobic membrane bioreactors (AnMBRs) for municipal wastewater treatment—potential benefits, constraints, and future perspectives: an updated review [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 802: 149612.
- [5] ZHANG Y L, ZHAO Y Y, CHU H Q, *et al.* Characteristics of dynamic membrane filtration: structure, operation mechanisms, and cost analysis [J]. *Environmental Chemistry*, 2014, 59(3): 247-260.
- [6] SIDDIQUI M A, BISWAL B K, SALEEM M, *et al.* Anaerobic self-forming dynamic membrane bioreactors (AnSFDMBRs) for wastewater treatment—recent advances, process optimization and perspectives [J]. *Bioresource Technology*, 2021, 332: 125101.
- [7] 孙琪媛,胡以松,王晓昌. 污水处理中厌氧动态膜生物反应器的研究进展[J]. *工业水处理*, 2017, 37(3): 1-5.
SUN Qiyuan, HU Yisong, WANG Xiaochang. Research progress in anaerobic dynamic membrane bioreactor (AnDMBR) for wastewater treatment [J]. *Industrial Water Treatment*, 2017, 37(3): 1-5 (in Chinese).
- [8] SIDDIQUI M A, DAI J, GUAN D, *et al.* Exploration of the formation of self-forming dynamic membrane in an upflow anaerobic sludge blanket reactor [J]. *Separation and Purification Technology*, 2019, 212: 757-766.
- [9] LEI Z, YANG S, LI X, *et al.* Revisiting the effects of powdered activated carbon on membrane fouling mitigation in an anaerobic membrane bioreactor by evaluating long-term impacts on the surface layer [J]. *Water Research*, 2019, 167: 115137.
- [10] YANG Y, ZANG Y, HU Y, *et al.* Upflow anaerobic

- dynamic membrane bioreactor (AnDMBR) for wastewater treatment at room temperature and short HRTs: process characteristics and practical applicability [J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 383: 123186.
- [11] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法 [M]. 4 版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- State Environmental Protection Administration. Water and Wastewater Monitoring Methods [M]. 4th ed. Beijing: Chinese Environmental Science Press, 2002 (in Chinese).
- [12] HU Y, DU R, NITTA S, *et al.* Identification of sustainable filtration mode of an anaerobic membrane bioreactor for wastewater treatment towards low-fouling operation and efficient bioenergy production [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 329: 129686.
- [13] 臧颖, 胡以松, 杨媛, 等. 投加零价铁对 AnDMBR 处理预浓缩污水的影响研究 [J]. 水处理技术, 2021, 47 (8): 91-95.
- ZANG Ying, HU Yisong, YANG Yuan, *et al.* Effects of zero-valent iron addition on anaerobic dynamic membrane bioreactor (AnDMBR) for pre-concentrated wastewater treatment [J]. Technology of Water Treatment, 2021, 47(8): 91-95 (in Chinese).
- [14] MAAZ M, YASIN M, ASLAM M, *et al.* Anaerobic membrane bioreactors for wastewater treatment: novel configurations, fouling control and energy considerations [J]. Bioresource Technology, 2019, 283: 358-372.
- [15] LIN H, PENG W, ZHANG M, *et al.* A review on anaerobic membrane bioreactors: applications, membrane fouling and future perspectives [J]. Desalination, 2013, 314: 169-188.
- [16] 田文瑞, 胡以松, 王晓昌. 动态膜生物反应器的运行特性及除污效果 [J]. 中国给水排水, 2015, 31(15): 16-19.
- TIAN Wenrui, HU Yisong, WANG Xiaochang. Performance and pollutant removal efficiency of dynamic membrane bioreactor [J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(15): 16-19 (in Chinese).
- [17] GUAN D, DAI J, WATANABE Y, *et al.* Changes in the physical properties of the dynamic layer and its correlation with permeate quality in a self-forming dynamic membrane bioreactor [J]. Water Research, 2018, 140: 67-76.
- [18] ERSAHIN M E, GIMENEZ J B, OZGUN H, *et al.* Gas-lift anaerobic dynamic membrane bioreactors for high strength synthetic wastewater treatment: effect of biogas sparging velocity and HRT on treatment performance [J]. Chemical Engineering Journal, 2016, 305: 46-53.
- [19] ZHANG L, DE VRIEZE J, HENDRICKX T L G, *et al.* Anaerobic treatment of raw domestic wastewater in a UASB-digester at 10 °C and microbial community dynamics [J]. Chemical Engineering Journal, 2018, 334: 2088-2097.
- [20] BANDARA W, KINDAICHI T, SATOH H, *et al.* Anaerobic treatment of municipal wastewater at ambient temperature: analysis of archaeal community structure and recovery of dissolved methane [J]. Water Research, 2012, 46(17): 5756-5764.
- [21] CRONE B C, GARLAND J L, SORIAL G A, *et al.* Corrigendum to “significance of dissolved methane in effluents of anaerobically treated low strength wastewater and potential for recovery as an energy product: a review” [J]. Water Research, 2017, 111: 420.
- [22] 杨媛. 两级动态膜反应器污水浓缩和厌氧发酵产能工艺特性研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2021.
- YANG Yuan. Study on the Process Characteristics of a Two-stage Dynamic Membrane System in Wastewater Concentration and Anaerobic Fermentation [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2021 (in Chinese).
- [23] 刘清华, 朱奕静, 曹丽娟, 等. 膜生物反应器 PVDF 膜和尼龙膜污染特性 [J]. 中国环境科学, 2020, 40 (3): 1089-1096.
- LIU Qinghua, ZHU Yijing, CAO Lijuan, *et al.* Membrane fouling characteristics of PVDF membrane and nylon mesh in Anammox-MBRs [J]. China Environmental Science, 2020, 40(3): 1089-1096 (in Chinese).
-
- 作者简介: 刘乐 (1996-), 女, 陕西西安人, 硕士研究生, 研究方向为膜法污水资源化技术。
E-mail: liu1543816524@163.com
收稿日期: 2022-09-12
修回日期: 2022-09-29

(编辑: 李德强)